

Verfahren und Transformator zum elektronischen
oder mechanischen Auftransformieren von Wechsel-
spannung

Ákos Kun, Fachingenieur für Elektrotechnik,
Budapest

Anmeldungstag: 7. 7. 1978

Das erfundene Verfahren zur Spannungstransformation und der auf Grundlage dieses Verfahrens herstellbare Transformator ermöglichen das Auftransformieren einer gegebenen Wechselspannung ohne Anwendung herkömmlicher induktiver Wandler, ohne Einsatz von Transformatoren, die eine getrennte Einheit bilden. Mit Hilfe des erfundenen Verfahrens wird die hochtransformierte Spannung durch impulsweise Ausnutzung der induktiven Energie eines beliebigen Elementes mit induktivem Charakter gewonnen.

Für den auf der ganzen Welt bekannten und allgemein verwendeten Transformator wurde - als ein Verfahren zur Spannungs- bzw. Stromtransformation - den drei ungarischen Ingenieuren Déri, Bláthy und Zipernowsky im Jahre 1855 das Patentrecht erteilt. Der Transformator spielt als getrenntes Wandlerelement induktiver Energie mit seinem sehr hohen Wirkungsgrad, mit seiner Fähigkeit zur galvanischen Trennung und seinen weiteren vorteilhaften Eigenschaften bis zum heutigen Tag eine unersetzliche Rolle in der Elektrotechnik. Herkömmliche Transformatoren

sind jedoch in bestimmten Anwendungsfällen wegen ihren hohen Gewichtes, grossen Abmessungen und relativ hohen Herstellungskosten nur schwer oder unter Hinnahme beträchtlicher Mehrausgaben anwendbar. Mit Hilfe des erfundenen Verfahrens zur Spannungstransformation kann die spannungstransformierende Funktion herkömmlicher Transformatoren in verschiedenen Bereichen der Elektrotechnik unter Umgehung der oben erwähnten Nachteile in spezieller Form ersetzt werden. Da das erfundene Verfahren zur Spannungstransformation und der auf Basis dieses Verfahrens herstellbare Transformator in ihrem Prinzip unmittelbar auf den physikalischen Eigenschaften der Induktivitäten und Kapazitäten beruhen, soll einerseits zum leichteren Verständnis des Verfahrens, andererseits zur möglichst weiten Verbreitung des praktischen Einsatzes, zunächst auf die Arbeitsweise dieser beiden Grundelemente der Elektrotechnik eingegangen werden.

Das kleinste, mit einer Ladung behaftete Teilchen der Materie ist das Elektron. Als atomares Teilchen nimmt das Elektron nicht nur am Gefügebau metallischer Materialien, an der Formierung derer physikalischen Eigenschaften Teil, sondern ist auch für die elektrische Leitung, die Schaffung des Ladungszustandes verantwortlich. Wegen ihrer negativen Ladung stossen sich die Elektronen sowohl im Atomverband, als auch vom Atom abgelöst gegenseitig ab. Atome mit unbesetzten Elektronenstellen auf

der äussersten Schale ziehen als positiv geladene Teilchen die Elektronen an. Diese Anziehungs- bzw. Abstossungskraft wird als elektrische Kraft bezeichnet. Das Elektron stösst alle Elektronen ab, gleichgültig in welcher Richtung sie sich davon befinden. Die Anziehungs- bzw. Abstossungskraft freier Elektronen treten in Form elektrischer Kraftlinien auf. Die elektrischen Kraftlinien der Elektronen verlaufen immer in radialer Richtung. Nach den Feststellungen der Quantenphysik gibt es eigentlich keine freie Elektronen, gibt es keinen Stoff, zwischen dessen Atomen im Ruhezustand freie Elektronen vorhanden wären. Die in den Stoffen unter verschiedenen äusseren Einwirkungen /z.B. Licht, Wärme, mechanischer Druck/ in Abhängigkeit von der Leitfähigkeit der Stoffe entstehenden freien Elektronen werden aus der äussersten Elektronenschale der Atome abgelöst. Im Ruhezustand kreist jedes Elektron auf einer bestimmten Bahn um den Atomkern. Da in atomaren Ausmassen die Bewegungsmöglichkeit der Elektronen auf einen relativ kleinen Raum beschränkt ist, kann der Elektronenmangel oder Elektronenüberschuss, der während der chemischen Bindung auftritt, nur die Umwandlung der Atome in Moleküle, die Einordnung in ein Kristallgitter hervorrufen. Im Ruhezustand tritt demnach wegen der begrenzten Bewegungsmöglichkeit der Elektronen im Stoff nur eine interne Ausrichtung auf, nach aussen weist der Stoff einen neutralen Zustand auf. Unter äusseren Einflüssen wird diese elektrische Neutralität der Stoffe aufgehoben, da infolge des starken Entzuges oder der starken Anreicherung

von Elektronen der Atomkern nicht mehr seine ordnende, neutralisierende Wirkung zur Geltung bringen kann. Bei elektrischer Anregung löst der Elektronenüberschuss, der aus der Spannungsquelle in den Stoff emittiert wird, aus der äusseren Elektronenschale der Atome weitere Elektronen ab. Der entstehende Elektronenüberschuss pflanzt sich wie eine Kettenreaktion von Atom zu Atom mit nahezu Lichtgeschwindigkeit in Form elektrischen Stromes fort.

Die Stossionisationsarbeit der freien Elektronen, d.h. das Ablösen der Elektronen aus der äusseren Schale der Atome und das Auffüllen der zurückgebliebenen, positiven Atome mit anderen Elektronen, verläuft nicht nur im Inneren des Stoffes, sondern auch an dessen Oberfläche. Die an die Oberfläche des Stoffes gelangten Elektronen können aufgrund ihrer Abstossungskraft genauso Elektronen aus der äussersten Elektronenbahn der benachbarten Atome ablösen, wie die Elektronen im Inneren des Stoffes. Demgegenüber rufen die Oberflächenelektronen bedeutende elektrische Veränderungen auf dem Material hervor, die hauptsächlich den Metallen Eigenschaften verleihen, die in der Elektrotechnik unentbehrlich sind. Bei dieser physikalischen Eigenschaft handelt es sich um die elektrischen Kraftlinien senkrecht zum Elektronenfluss. Von den strahlenförmigen Kraftlinien der freien Elektronen, die sich an der Oberfläche des Stoffes befinden, wird nur ein Teil für die Stossionisation ver-

wendet, ein anderer, beträchtlicher Teil wird wegen des Fehlens der Atome von oben aus dem Material ausgestrahlt. Diese Erscheinung wird noch durch den sog. Skin-Effekt verstärkt, der vorwiegend bei hohen Frequenzen auftritt. Die im Inneren des Stoffes befindlichen freien Elektronen versuchen den Abstossungskräften aus allen Richtungen zu entweichen und werden an die Oberfläche des Stoffes gedrängt, wo eine abstossende Wirkung nur aus seitlicher Richtung kommen kann. Durch den Skin-Effekt tritt über den Querschnitt des Materials eine scheinbare Dichteabnahme ab, während sich die Materialoberfläche immer im gesättigten Zustand befindet. Die Ausstrahlung elektrischer Kraftlinien bleibt solange aufrechterhalten, solange freie Elektronen im Stoff vorhanden sind, unabhängig davon, ob der Elektronenfluss inzwischen unterbrochen wurde /aufgeladener Kondensator/. Bei Aufrechterhaltung des Elektronenflusses pflanzen sich die elektrischen Kraftlinien mit dem Elektronenstrom fort, d.h. die ausgestrahlten Kraftlinien der Oberflächenelektronen werden von diesen mitgenommen. Diese physikalische Eigenschaft ruft, obwohl sie in der Praxis selbst eine wichtige Eigenschaft den Stoffen verleiht, noch eine andere Begleiterscheinung hervor. Diese Begleiterscheinung ist die sog. Induktionsfähigkeit elektrisch strahlender Stoffe, d.h. die Fähigkeit, bei ständiger Kraftlinienänderung auch ohne galvanische Verbindung in einem anderen metallischen Material, das mit dem ersten in Wechselwirkung steht, freie Elektronen zu erzeugen und zu bewegen.

Der Einfachheit halber soll der Induktionsmechanismus zunächst an zwei parallel gespannten Metalldrähten untersucht werden /Abb. 1/a/. An den Draht "a" wird eine Gleichspannung gelegt, der Draht "b" wird über ein Amperemeter kurzgeschlossen. Nach dem Anlegen der Spannung an den Draht "a" tritt am Amperemeter im Kreis "b" ein Ausschlag auf, der anzeigt, dass im Draht "b" für eine kurze Zeit ein Elektronenfluss aufgetreten ist. Der durch den induzierenden oder Primärkreis "a" im Sekundärkreis "b" erzeugte Anfangsstrom ist darauf zurückzuführen, dass die als Begleiterscheinung des Elektronenflusses I_a im Draht "a" auftretende elektrische Kraftlinienausstrahlung den Gleichgewichtszustand im Draht "b" aufhebt und aus der äussersten Elektronenschale der Atome, auf die die elektrischen Kraftlinien einwirken, freie Elektronen ablöst. Die Atome im Draht "b" werden ionisiert und versuchen als positiv geladene Ionen den benachbarten Atomen Elektronen aus der äussersten Schale zu entreissen, um auf den eigenen Elektronenschalen die ursprüngliche Besetzung zu erreichen. Deshalb entsteht im Draht "b" ein Elektronenfluss, der immer dem im Draht "a" ablaufenden Elektronenfluss entgegengesetzt ist und solange dauert, wie die Kraftlinien des Drahtes "a" die zweite Leitung durchsetzen, d.h. die im angeregten Zustand befindlichen Atome des Drahtes "b" Elektronen aus der Umgebung entziehen können. Wenn die Kraftlinien die Leitung "a" vollständig durchsetzt haben, verschwindet auch der entgegengesetzte Elektronenfluss in der Leitung "b" und das Amperemeter geht in seine Ausgangs-

stellung zurück. Ursache für das Aufhören des Elektronenflusses im Draht "b" bei Gleichspannungserregung ist nicht das Verschwinden der Induktionswirkung von Draht "a" auf Draht "b", sondern ist darin zu suchen, dass alle Atome des Drahtes "b" sich ständig im angeregten Zustand befinden und somit keine weiteren Atome vorhanden sind, die von ihrer äusseren Elektronenschale Elektronen abgeben können. Dieser Zustand des Drahtes "b" ist relativ mit dem Grundzustand identisch, in dem ebenfalls keine freie Elektronenbewegung möglich ist.

Biegt man den Metalledraht bogenförmig zusammen, so verdichten sich, konzentrieren sich die elektrischen Kraftlinien im Inneren des Ringes. Bei spiralförmiger Gestaltung des Metalledrahtes addieren sich die Kraftlinien der einzelnen Schleifen und üben so in verstärkter Form eine Induktionswirkung auf den Sekundärkreis aus./Abb. 1/b-c-d/. Der Wirkungsgrad der Induktion ist im hohen Masse von dem Winkel, den die geometrischen Achsen der Primär- und Sekundärwicklung miteinander einschliessen, sowie von der Entfernung der beiden Spulen voneinander abhängig. Die grösste Induktion kommt dann zustande, d.h. die Kraftlinien der Primärwicklung schneiden die Windungen der Sekundärwicklung dann mit dem besten Wirkungsgrad, wenn die geometrischen Achsen der beiden Wicklungen zusammenfallen oder parallel zueinander verlaufen und die Entfernung zwischen ihnen minimal ist.

Verwendet man Wicklungen mit mehreren Windungen, so übt die Primärwicklung nicht nur auf die Sekundärwicklung eine induzierende Wirkung aus, sondern zwischen den einzelnen Windungen der Primärwicklung tritt ebenfalls eine Induktion auf, die man als Selbstinduktion bezeichnet. Bei Wicklungen mit mehreren Windungen kommt die Selbstinduktion dadurch zustande, indem die elektrische Kraftlinienänderung, die durch den Elektronenfluss in den einzelnen Windungen der Primärwicklung hervorgerufen wird, nicht nur auf die Sekundärwicklung induzierend wirkt, sondern auch in den benachbarten Windungen der eigenen Wicklung einen Strom entgegengesetzter Richtung induziert. Der ohmsche Strom in der Hauptrichtung und der Selbstinduktionsstrom in entgegengesetzter Richtung verleihen der Wicklung eine Eigenschaft, die in der Schaltungstechnik unentbehrlich ist. Diese Anordnung eines Metalldrahtes bezeichnet man als Induktivität, deren Haupteigenschaft der hohe Widerstand bei einer Strombelastung wechselnder Intensität ist. Beim Speisen der Induktivität mit Wechselstrom kommt der hohe Widerstand unmittelbar dadurch zustande, dass dem ohmschen Strom der Selbstinduktionsstrom entgegenfließt und diesen im starken Masse kompensiert, den ohmschen Stromverbrauch der Wicklung ausgleicht. Bei mehreren getrennten Wicklungen tritt - auch zwischen den einzelnen Wicklungen - die gleiche Erscheinung auf, die in ihrer Wirkung gerade entgegengesetzt ist. Diese Form der Induktion wird als Gegeninduktion bezeichnet. Verwendet man anstelle

der Wechselstromquelle eine Gleichstromquelle, verhält sich die Wicklung nur im Einschaltmoment wie ein grosser Widerstand. Da keine weitere Induktion auftritt, verhält sich die Wicklung für die Gleichstromquelle wie ein ausgespannter Draht, obwohl die einzelnen Windungen ihre Kraftlinien weiter beibehalten und konzentrieren /Elektromagnet/.

Damit in der Wicklung eine Selbstinduktion, die zu dem hohen Widerstand führt, auftreten kann, muss die Wicklung einer Wechselstrombelastung unterworfen werden, d.h. eine Spannung angelegt werden, die die freien Elektronen der Wicklung ständig in Bewegung hält. Wechselspannungsquellen mit sinusförmiger Ausgangsamplitude und sich periodisch änderndem Vorzeichen genügen ideal der voranstehenden Forderung. Deshalb ist die Schaltung auf Abb. 2/a restlos zur Realisierung der Selbstinduktion und der Induktionswirkung des Primärkreises auf den Sekundärkreis geeignet. Die induzierende Wirkung des Primärkreises auf den Sekundärkreis ist im vorliegenden Fall viel besser ersichtlich als bei Gleichspannungsverhältnissen. Bei Beaufschlagung mit einer Wechselspannung kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt die wichtigste Eigenschaft der Induktion veranschaulicht werden: die 180° -Phasenverschiebung zwischen dem Primärstrom und dem induzierten Sekundärstrom /Abb. 2/b/. Unter den gleichen Bedingungen ist eine weitere, interessante Eigenschaft der Induktion zu verzeichnen. Die induzierende und induzierte Spannungen besitzen die gleiche Phase. Das heisst die Induktion be-

sitzt die besondere Eigenschaft, dass die zwischen dem Primär- und Sekundärstrom bestehende Phasenverschiebung von 180° zwischen der Primär- und Sekundärspannung keine Phasenverschiebung hervorruft /Abb. 2/c/.

Zur Klärung dieser Erscheinung wird erneut auf Abb. 1/a zurückgegriffen. Die durch die Primärspannung in die Primärleitung emittierten Elektronen erscheinen, da der Elektronenfluss vom positiven zum negativen Pol gerichtet ist, zuerst immer am oberen Ende der Leitung. Wie weiter oben bereits beschrieben wurde, wird das Ladungsgleichgewicht der Sekundärleitung infolge des in der Primärleitung von oben nach unten wandernden Elektronenflusses und der damit verbundenen elektrischen Kraftlinienausstrahlung ebenfalls zuerst am oberen Ende der Leitung gestört. Die am oberen Ende der Sekundärleitung entstehenden positiven Atome sind bestrebt, die von ihrer äussersten Elektronenschale abgelösten Elektronen von noch im Ruhezustand befindlichen Atomen zurückzugewinnen. Die Folge davon ist, dass der Elektronenfluss in der Sekundärleitung immer in entgegengesetzter Richtung verläuft, im vorliegenden Fall von unten nach oben. Die Sekundärspannung hingegen nimmt nicht die Richtung des Stromes an, da sich die Elektronen, die durch die Kraftlinienausstrahlung der Primärleitung abgelöst wurden, noch immer am oberen Ende der Leitung befinden, und deren Zahl sich infolge des entgegengesetzten Elektronenflusses noch erhöht. Auf diese Weise nimmt das obere Ende der Sekundärleitung - genauso wie der negative

Pol am oberen Ende der Primärleitung - immer das stärker negative Potential als das untere Ende an. Diese Ladungsverschiebung verursacht von aussen gesehen die Phasengleichheit der Spannung zwischen den beiden Enden der Sekundärleitung mit der Primärspannung. Selbstverständlich ändert sich beim Anlegen einer Wechselspannung periodisch die Polarität der Sekundärspannung.

Auf Abb. 2/d sind die Merkmale der Selbstinduktion dargestellt. Anhand der Phasenverhältnisse kann festgestellt werden, dass bei der Spannung U_{\max} der Strom am kleinsten ist. In diesem Moment ist die Selbstinduktion am grössten, schwächt die elektrische Ausstrahlung der einzelnen Windungen ihre Ursache auf ein Minimum, stellt die Selbstinduktion dem ohmschen Strom einen Selbstinduktionsstrom der nahezu gleichen Grösse, aber entgegengesetzter Richtung entgegen. Da die Wechselstrombelastung eine Belastung sich ständig ändernder Intensität mit periodisch wechselndem Vorzeichen darstellt, ist leicht einzusehen, dass der - auch als Induktionswiderstand bezeichnbare - Widerstand von Induktivitäten gegenüber Wechselstrom mit der Frequenz der Stromquelle zunimmt. Ausser diesen äusseren Faktor wird der Wert des Induktionswiderstandes stark von dem Selbstinduktionsfaktor der Wicklung beeinflusst, der einen Koppelfaktor darstellt und von den Abmessungen, der Zahl und der Anordnung der einzelnen Windungen abhängt. Die Grösse des Selbstinduktionsfaktors ist ausserdem von dem Material, in dem sich die elektrischen Kraftlinien fort-

planzen, sowie von der Qualität dieses Materials abhängig. Ordnet man in der Wicklung einen magnetisierbaren Stoff an, d.h. einen Stoff, in dem die elektrischen Kraftlinien eine bleibende Elektronenformation hervorrufen, erhöht sich der Wirkungsgrad der Induktion beträchtlich. Für diesen Zweck verwendet man in der Praxis meistens Weicheisen. Da die elektrischen Kraftlinien der Wicklung in allen metallischen Stoffen und damit auch in Weicheisen einen Strom induzieren, sind Massnahmen zu treffen, um die entstehenden Wirbelstromverluste auf ein Minimum zu senken. Geeignet hierzu sind der Blechaufbau oder Weicheisenpulver mit Klebstoffen vermischt.

Für die praktische Ausnutzung der Induktion spielt die Eigenschaft der Induktivitäten eine wichtige Rolle, nach der die Übergabe der Energie aus der Primärwicklung in die Sekundärwicklung leistungsmässig erfolgt. Auf dieser Eigenschaft beruht auch das Prinzip des Transformators. Innerhalb der in die Primärwicklung eingespeisten maximalen Leistung kann diese auf der Sekundärseite im beliebigen Verhältnis zwischen Strom und Spannung zurückgewonnen werden. Ausser der leistungstransformierenden Eigenschaft besitzt dieses, in der Umwandlung elektrischer Energie unentbehrliche Mittel gegenüber den Wandlern auf ohmscher oder Halbleiterbasis aufgrund der Selbstinduktion den Vorteil, dass die nicht verbrauchte Energie fast vollständig in das Netz zurückgespeist wird. Ein weiterer Vor-

teil der induktiven Wandler, der wegen der geerdeten Weiterleitung der elektrischen Energie oft unentbehrlich ist, stellt die galvanische Trennung des Verbrauchers von der Quelle dar. Anhand der bisherigen Erläuterungen scheint es, dass bei Induktivitäten mit mehr als einer Wicklung kein wesentlicher Unterschied zwischen der Gegeninduktion zwischen Primär- und Sekundärwicklung und der Selbstinduktion in der Primärwicklung besteht, da als Ursache der beiden Erscheinungen die Primärwicklung als Induktionsquelle in Betracht kommt. Im Leerlauf, d.h. bei unbelastetem Transformator ist diese Feststellung auch richtig. Die durch die Primärwicklung erzeugte Induktion führt in den eigenen Windungen zum Selbstinduktionsstrom mit kompensierender Wirkung, in der Sekundärwicklung erscheint der durch die Primärwicklung ohne galvanische Verbindung erzeugte Induktionsstrom. Zwischen dem induzierten Strom in der Sekundärwicklung und dem Primärstrom besteht, wie weiter oben bereits erwähnt wurde, eine Phasenverschiebung von 180° . Diese Phasenverschiebung ist die Ursache für das Zustandekommen der Gegeninduktion. Durch Belastung der Sekundärseite beginnt dieser gegenphasige Strom in der Sekundärwicklung zu fließen, der wie jeder andere Elektronenfluss eine elektrische Ausstrahlung zur Folge hat. Diese elektrische Kraftlinienausstrahlung wirkt aber wegen der Phasenverschiebung um 180° der Richtung der elektrischen Kraftlinien in der Primärwicklung genau entgegen. In der Sekundärwicklung tritt somit eine zweifache Induktion auf:

Die Primärinduktion erzeugt einen Strom in der Wicklung und die Sekundärinduktion, die durch diesen Strom erzeugt wird, wirkt auf die ursprüngliche Erscheinung zurück, versucht diese zu unterdrücken. Diese Wechselwirkung zwischen Primär- und Sekundärinduktion bezeichnet man als Gegeninduktion. Die Gegeninduktion setzt jedoch, indem sie ihrer Ursache entgegenwirkt, nicht nur die induzierende Wirkung der Primärwicklung auf die Sekundärwicklung herab, sondern schwächt auch die Wirkung der Selbstinduktion zwischen den einzelnen Windungen der Primärwicklung. Anhand dessen kann festgestellt werden, dass die Selbstinduktion für Transformatoren zur Umwandlung elektrischer Energie ausgesprochen vorteilhaft ist, die Gegeninduktion jedoch sich nachteilig auswirkt, da die induktionserregende Wicklung durch sie allmählich ihren induktiven Charakter verliert. In der Praxis macht sich diese Erscheinung in bekannter Weise bemerkbar. Durch Erhöhung der sekundärseitigen Belastung nimmt die Primärwicklung immer mehr ohmschen Charakter an, wodurch ein immer höherer Strom durch sie fließt.

Auf der 180° -Phasenverschiebung zwischen Primär- und Sekundärstrom beruht auch die Arbeitsweise des Autotransformators. Durch Verbindung der Primärwicklung mit der Sekundärwicklung nach Abb. 3/a addieren sich wegen der Phasengleichheit die Spannungen in den beiden Wicklungen. An den Punkten p1 - s2 erscheint die Summe der Spannungen von Primär- und Sekundärwicklung. Bei Belastung des Trans-

formators stimmt jedoch die Summe der Ströme, die getrennt in der Primär- und Sekundärwicklung fließen, nicht mit der resultierenden Stromaufnahme der in Serie geschalteten Wicklungen überein. Ursache dieser Erscheinung ist der gegenphasige Elektronenfluss. Der in der Sekundärwicklung erzeugte Strom fließt wegen der Phasenverschiebung um 180° dem Primärstrom entgegen, so dass sich die beiden Ströme einander neutralisieren. Im Endergebnis tritt in den beiden Wicklungen nur die Differenz zwischen den beiden Strömen auf. Das bedeutet, dass für Transformatoren gleicher Leistung bei der Herstellung von Autotransformatoren eine geringere Drahtstärke ausreichend ist. Deshalb bezeichnet man diesen Typ auch als Spartransformator. Nachteil des Spartransformators ist die galvanische Verbindung zwischen Primär- und Sekundärkreis.

Ordnet man zwei Metallplatten einander gegenüber an /Abb. 3/b/ und verbindet die eine Metallplatte mit dem negativen, die andere mit dem positiven Pol einer Gleichstromquelle, so fließen vom negativen Pol der Stromquelle über das Verbindungskabel Elektronen zur Platte "a", in der ein Elektronenüberschuss entsteht. Die in der negativen Platte des Kondensators angehäuften freien Elektronen üben über den schmalen Luftspalt eine abstossende Wirkung auf die Elektronen der positiven Platte aus. Die am Rande des Luftspaltes angehäuften freien Elektronen der negativen Platte lösen infolge ihrer elektrischen Kraftlinienausstrahlung Elektronen aus der äusseren Schale

der Atome der Platte "b" ab. Diese freien Elektronen werden vom positiven Pol der Gleichstromquelle fast vollständig abgesaugt, wodurch die Platte "b" positive Ladung annimmt. Nach dem kurzen Aufladeprozess tritt ein Gleichgewichtszustand ein, in dem kein weiterer Elektronenfluss möglich ist. Beim Unterbrechen des Stromkreises behält der Kondensator seine Ladung unverändert bei. In Gleichstromkreisen verhält sich der Kondensator somit wie ein Ladungsspeicher, wie ein Element zur Elektronenverdichtung. Da im Gleichgewichtszustand der Elektronenfluss verschwindet, kann der Kondensator in Gleichstromkreisen als ein Element aufgefasst werden, das im Einschaltmoment einen kurzen, aber hohen Strom zulässt, danach sich wie ein unendlich grosser Widerstand verhält. Durch Kurzschliessen oder Entladen des aufgeladenen Kondensators kommt es im Stromkreis zu dem gleichen schnellen und intensiven Elektronenfluss wie im Einschaltmoment, nur in entgegengesetzter Richtung /Ladungsausgleich/. Die Kapazität des Kondensators ist umso grösser, je grösser die Fläche der gegenüberstehenden Metallplatten und je kleiner der Abstand zwischen diesen sind. Die Verringerung des Abstandes wird jedoch durch die Möglichkeit eines Überschlages zwischen den zwei Metallplatten begrenzt. Der Wert der Kapazität wird ausserdem durch das Dielektrikum der Isolierschicht zwischen den beiden Platten bestimmt, da infolge des unterschiedlichen Ladungszustandes der Platten ein geringer Verluststrom entsteht, der den Wirkungsgrad der Ladungsspeicherung herabsetzt.

Wie aus der obigen Beschreibung hervorgeht, kommt es bei einer Beaufschlagung mit Gleichspannung im Stromkreis nur zum Einschalt- bzw. Ausschaltzeitpunkt zu einem Elektronenfluss, d.h. wenn im Ladungszustand des Kondensators eine Veränderung auftritt. Da eine Wechselspannungsbelastung eine sich ständig ändernde Belastung darstellt, tritt beim Anlegen einer Wechselspannung an den Kondensator eine ständige Ladungsänderung im Stromkreis auf /Abb. 3/c/. Im Verbindungskabel wirkt sich dieser ständig ändernde Elektronenfluss als Ergebnis des sich periodisch wiederholenden Aufladungs- und Entladungsvorganges mit wechselndem Vorzeichen aus. Auf Abb. 3/d sind in anschaulicher Form die im Kondensator auftretenden Spannungs- und Stromverhältnisse für beliebige Phasenlagen und die Phasenverschiebung der Spannungen zueinander dargestellt. Obwohl der Kondensator im Stromkreis eine ohmsche Unterbrechung darstellt, ist er aufgrund seines speziellen Leitungsmechanismus in der Lage, in Wechselstromkreisen einen effektiven Strom zu erzeugen. Von aussen betrachtet kann dieser Strom so interpretiert werden, als ob er über den Kondensator fliessen würde. Im Interesse einer einfachen Behandlung bauen praktische Berechnungen auf dieser Voraussetzung auf. In dieser Weise wurde der Begriff des kapazitiven Widerstandes eingeführt. Der Wechselstromwiderstand des Kondensators ist nicht nur von der Nennkapazität, sondern auch von der Frequenz der Stromquelle abhängig. Der kapazitive Widerstand des Kondensators gegenüber Wechselstrom ist umso kleiner, je grösser seine

Kapazität und je höher die Frequenz der Wechselspannung ist.

Zurückkehrend zur Wirkungsweise der weiter oben beschriebenen Induktivitäten, soll an die Spule auf Abb. 4/a jetzt eine Wechselspannung angelegt werden. Die durch die Wechselspannung verursachte periodische Stromrichtungsänderung sowie die ständige Mengenänderung der Elektronen führen infolge der Selbstinduktion in der Spule zu Veränderungen, die eine 90° -Phasenverschiebung zwischen dem Spulenstrom und der ihn erzeugenden Spannung zum Ergebnis hat. Durch Unterbrechen des Stromkreises soll jetzt untersucht werden, wie die Induktivität auf das plötzliche Verschwinden der angelegten Spannung reagiert. In der auf Abb. 4/b dargestellten Weise kommt es in der Spule zu einem induktiven Spannungsschoss, der in der bisherigen Praxis für die angeschlossenen Bauelemente eher schädlich als nützlich war. Bei eingehender Betrachtung fällt die Amplitude der beim Ausschalten entstehenden induktiven Spannungsschösse auf. Selbst bei Spulen mit durchschnittlichem induktivem Widerstand ist der Wert eines solchen Spannungsschosses um mehr als eine Größenordnung höher als der Spitzenwert der Versorgungsspannung. Die Ursache dieses intensiven Effektes ist unmittelbar im Induktionsprinzip zu suchen und eine ähnliche Erscheinung tritt weder in rein ohmschen Bauelementen noch in Kondensatoren, die ebenfalls durch einen phasenverschobenen Strom charakterisiert sind, auf. Wie weiter oben bereits

festgestellt werden konnte, entsteht in einer Spule, die ständig mit Wechselspannung gespeist wird, ein durch diese Spannung erzeugter Elektronenfluss, der zu einer Kraftlinienänderung sich ständig ändernder Intensität in den einzelnen Windungen der Spule führt. Diese Kraftlinienausstrahlung wirkt auch auf die benachbarten Windungen und erzeugen dort einen Strom, der dem ohmschen Strom entgegengesetzt ist. In Abhängigkeit davon, ob die einzelnen Windungen innerhalb der Induktivität galvanisch miteinander in Verbindung stehen oder nicht, handelt es sich bei diesem Strom um einen Induktionsstrom /Sekundärwicklung/ oder Selbstinduktionsstrom /Primärwicklung/. Der entstehende induktive Strom kann jedoch nie grösser sein als der ihn erzeugende ohmsche Strom. Die Induktion ist nur indirekt wirksam.,Der durch die angelegte Spannung erzeugte ohmsche Strom führt in den einzelnen Windungen der Spule zunächst zu einer elektrischen Kraftlinienausstrahlung, die wiederum durch Einwirkung auf die einzelnen Windungen den induktiven Strom erzeugt. Wegen der verlustbehafteten Energieumwandlung kann der induktive Strom somit nie den Wert des ohmschen Stromes erreichen. Das bedeutet, dass mit Hilfe der Induktion nur eine Energieumwandlung, aber keine Energiegewinnung möglich ist. In ständig unter Spannung liegenden Induktivitäten besitzt die Selbstinduktion als eine Sonderform der Induktion nur die Aufgabe der Energierückgewinnung, tiefgreifende Veränderungen sind mit der Selbstinduktion in diesem Zustand nicht möglich.

Wie bereits beschrieben macht sich die energierückgewinnende Wirkung der Selbstinduktion nach aussen in der scheinbaren Erhöhung des Wicklungswiderstandes bemerkbar. Von innen betrachtet führt die Erscheinung infolge der Wechselwirkung der einzelnen Windungen in jeder Windung ausser dem ohmschen Strom zu einem Strom in entgegengesetzter Richtung. Wegen des Phasenunterschiedes wirken die beiden Ströme einander entgegen, versuchen sich gegenseitig auszulöschen. Da der induktive Strom stets schwächer ist, kann er vom ohmschen Strom noch innerhalb der Spule unterdrückt werden, dass von aussen kein Selbstinduktionsstrom nachweisbar ist. Beim Unterbrechen des Stromkreises verschwindet jedoch der ohmsche Strom und die durch ihn erzeugten elektrischen Kraftlinien bleiben noch für kurze Zeit bestehen. Diese Kraftlinien wirken nach der Unterbrechung genauso weiter, als ob im Stromkreis keine Änderung aufgetreten wäre. Wegen der fehlenden Energiezuführung bleibt die nachträgliche induzierende Wirkung der in der Spule vorhandenen elektrischen Kraftlinien nur noch für sehr kurze Zeit bestehen, aber während dieser kurzen Zeit gehen in der Spule tiefgreifende Veränderungen vor sich. Dem durch die verbleibenden Kraftlinien erzeugten Selbstinduktionsstrom steht, da der Stromkreis unterbrochen worden ist, kein ohmscher Strom mehr entgegen, der ihm entgegenwirken könnte. Bis zu entgültigen Verschwinden der elektrischen Kraftlinien kann der Selbstinduktionsstrom frei seine Wirkung entfalten. Das einzige Hindernis für ihn

bedeutet der ohmsche Widerstand der Spule. Da nach dem Ausschalten die in der Spule noch eine Zeit gespeicherten elektrischen Kraftlinien in der gleichen Weise wirken, wie sie entstanden sind, d.h. von Windung zu Windung sich aufsummierend, entsteht in jeder einzelnen Spule die gleiche Stromstärke. Der in den einzelnen Windungen fliessende Strom erzeugt über den Widerstand der Windungen eine definierte Spannung und diese Spannungsabfälle erzeugen schliesslich den induktiven Spannungsschoss an den Anschlüssen der Spule. Die Grösse des induktiven Spannungsschosses wird in erster Linie durch die Energiemenge, die der ohmsche Strom in Form von elektrischen Kraftlinien übergibt, und die Windungszahl der Spule bestimmt. Weiterhin ist die Amplitude der entstehenden Spannung vom Selbstinduktionsfaktor der Spule abhängig. Anhand der bisherigen Ausführungen kann festgestellt werden, dass in der Selbstinduktion eine Möglichkeit zur Energieumformung vorhanden ist, mit deren Hilfe in Induktivitäten eingespeiste Spannungen auftransformiert werden können, ohne die bisher bekannten Wandler oder Spannungsvervielfacher in Anspruch zu nehmen.

Auf diesem Prinzip beruht das erfundene Verfahren zum Auftransformieren von Wechselspannungen und der nach diesem Verfahren herstellbare erfundene Transformator. Durch Erhöhung der Anzahl der induktiven Spannungsschüsse erreicht man schliesslich einen Punkt, dass die

nacheinander folgenden Spannungsimpulse eine stetige Spannungskurve bilden, die im weiteren als auftransformierte Wechselspannung geeignet sind /Abb. 5/a/. Der grosse Vorteil des erfundenen Transformierverfahrens gegenüber den herkömmlichen Umspannungsverfahren besteht darin, dass mit Hilfe dieser Methode nicht nur unter Einsatz einer getrennten induktiven Energieumwandlungseinheit auftransformierte Wechselspannungen erzeugt werden können, sondern auch durch die unmittelbare Ausnutzung der Blindenergie beliebiger Verbraucher mit induktivem Charakter. Zur Ausbeutung der induktiven Energie induktiver Verbraucher ist nach dem erfundenen Verfahren nichts weiter erforderlich, als in Reihe mit dem Verbraucher eine periodisch arbeitende Unterbrechungseinheit zu schalten. Am Verbraucher erscheint dann in Abhängigkeit von der Schaltfrequenz die auftransformierte Spannung.

Eine Spannungsveränderung ist jedoch durch Änderung der Schaltfrequenz nicht erreichbar. Das erfundene spannungs-transformierende Verfahren erzeugt unabhängig von der Schaltfrequenz immer die maximale induktive Spannung im Lastkreis. Durch Veränderung der Schaltfrequenz kann die an der Last zur Verfügung stehende induktive Leistung geregelt werden, die Spannung hingegen nicht. Wenn in einer Halbperiode der angelegten Speisespannung der Unterbrecherkreis nur einmal einschaltet, wird durch diese eine Unterbrechung die gleiche Spannung erzeugt, als wenn die Unterbrechung ständig und mit hoher Frequenz

abliefe. Ein Unterschied besteht nur darin, dass im ersten Fall an der Last nur ein schmaler Spannungsimpuls entsteht, im zweiten Fall diese Impulse so schnell aufeinander folgen, dass sie eine zusammenhängende Spannungskurve bilden. Da die Fläche unter der Spannungskurve proportional der Leistung der erzeugten Spannung ist, ist leicht einzusehen, dass mit der Schaltfrequenz nur die Grösse der gewonnenen induktiven Energie, aber nicht die Amplitude der Spannungsimpulse beeinflusst werden kann. Diese Eigenschaft anundfürsich würde die Anwendbarkeit des Verfahrens im starken Masse einschränken. Im vorliegenden Falle würde sogar die wichtigste Eigenschaft des erfundenen Verfahrens, die Variierbarkeit der auftransformierten Spannung unmöglich gemacht. Im Interesse einer breiten Verwendbarkeit muss noch eine Methode zur Herabsetzung der hohen induktiven Spannung auf den gewünschten Wert gefunden werden.

Als einfachste Methode zur Herabsetzung der maximalen induktiven Spannung bietet sich das Teilerverfahren an. Das heisst durch einen parallel geschalteten Widerstand kann ein Teil der induktiven Energie verbraucht werden, wodurch auch die über den Lastwiderstand abfallende induktive Spannung abnimmt. Diese Methode wäre nicht nur unwirtschaftlich, sondern würde bei Leistungstransformation zu bedeutenden Verlustwärmeproblemen führen. Deshalb wird bei dem erfundenen Transformierverfahren die Verringerung der induktiven Spannung auf den gewünschten Wert auf andere Weise gelöst. Da die Methode unmittel-

bar auf die Stromresonanz zwischen Induktivität und Kapazität zurückzuführen ist, soll zunächst die Arbeitsweise paralleler LC-Kreise betrachtet werden.

Bei getrennter Untersuchung der Induktivität "L" und Kapazität "C" des Parallelkreises auf Abb. 5/b kann festgestellt werden, dass beide Elemente eine bestimmte Reaktanz besitzen. Wenn induktiver und kapazitiver Widerstand beider Elemente übereinstimmen, tritt im Stromkreis ein besonderer Leitungsvorgang auf, den man als Resonanz bezeichnet. Dieser besondere Leitungsvorgang in parallelen LC-Kreisen im Falle $X_L = X_C$ kommt dadurch zum Ausdruck, dass nach Anlegen der äusseren Spannung " U_K " der im Kreis fliessende Strom in der gemeinsamen Zuleitung nicht nachweisbar ist. Abgesehen von minimalen Verlusten fliesst in den Zuleitungen kein Strom.

Aufgrund der Arbeitsweise der zwei Grundelemente sowie der relativen Verschiebung der Strom-Spannungs-Charakteristik ist leicht die Ursache dieses speziellen Elektronenflusses einzusehen. Aus dem Vergleich der im Kreis fliessenden induktiven und kapazitiven Ströme geht hervor, dass bei Resonanz zwischen induktivem und kapazitivem Strom genau eine Phasenverschiebung von 180° auftritt /Abb. 6/a/. Das bedeutet, dass in den positiven und negativen Halbperiode der Wechselspannung im Kreis gleichzeitig Stromaufnahme und Stromabgabe besteht. Im Resonanzfall wird in der ersten Viertelperiode der Strombedarf des Kondensators durch den Selbstinduktionsstrom

der Induktivität gedeckt, in der zweiten Viertelperiode muss die Induktivität keinen Strom aus dem Netz aufnehmen, da ihr Strombedarf durch die in dem gleichen Viertel zurückgespeiste Energie des Kondensators gedeckt wird. Von aussen gesehen kann das System auch so betrachtet werden, als ob sich die beiden Ströme einander auslöschen und deshalb kein Differenzstrom in den Zuleitungen fließt. In parallelen LC-Kreisen hat die externe Versorgungsspannung nur zur Aufgabe, den Elektronenfluss aufrecht zu erhalten, die Elektronen zwischen den beiden Elementen periodisch hin und her zu bewegen. Energie muss die Versorgungsquelle nicht abgeben. Dieser spezielle Fall der Elektrotechnik stellt eine Analogie zu dem bekannten Zusammenhang zwischen potentieller und kinetischer Energie in der Mechanik dar. Bei in Resonanz befindlichen parallelen LC-Kreisen reicht es aus, dass die externe Speisespannung als potentielle Energie anliegt, und muss nicht in Bewegungsenergie umgewandelt werden, d.h. Energie in Form eines stetigen Elektronenflusses abgeben.


Aus diesem Verhalten paralleler LC-Kreise, nach dem der Stromversorgungsquelle keine Energie entzogen wird, d.h. kein ohmscher Strom durch den Kreis fließt, kann eine sehr wichtige Schlussfolgerung gezogen werden. Mit Hilfe eines parallel zur Induktivität geschalteten Kondensators ist es möglich, einen bestimmten Teil der induktiven Energie zu entziehen, ohne dass daraus Verluste entstehen. Gegenüber der weiter oben vorgeschlagenen Spannungs-

teilerverfahren muss im vorliegenden Fall nicht mit den Wärmeverlusten der entzogenen Energie gerechnet werden und in den Zuleitungen treten keine überflüssigen ohmschen Verluste auf. Im erfundenen Verfahren zur Spannungstransformierung wird, abgesehen vom Lastwiderstand, die Grösse der entstehenden Spannung im entscheidenden Masse von der kapazitiven Reaktanz des Kreises bestimmt. Je genauer im erfundenen Transformator die kapazitive Reaktanz mit der induktiven Reaktanz übereinstimmt, desto kleiner wird die auftransformierte Spannung.

Die Ausführung des erfundenen Transformators ist auf zwei Wegen möglich. Abhängig vom verwendeten Schaltelement erfolgt die Transformierung elektronisch oder mechanisch /Abb. 6/b/. Beim elektronischen Verfahren wird die Spannung durch ein impulsgesteuertes Halbleiterelement /z.B. Triac, AC-Transistor/ periodisch unterbrochen. Das mechanische Verfahren nutzt zur periodischen Unterbrechung eine Rotations- oder Schwingmechanik aus /z.B. Vibrator, Kommutator-Rotationsmechanik/. Die praktischen Anwendungsmöglichkeiten des erfundenen Transformators liegen auf allen Bereichen der Elektroindustrie, wo der Einsatz herkömmlicher induktiver Wandler wegen ihres Gewichtes, ihrer Abmessungen oder aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht zweckmässig oder ganz unmöglich ist. Mit konstanter Schaltfrequenz ist das erfundene Verfahren vorteilhaft in der Messtechnik verwendbar. In schneller und einfacher Weise kann man die aufgenommene induktive Energie, Blindleistung verschiedener ohmscher Verbraucher bestimmen.

Patentansprüche:

1. Verfahren und Transformator zur elektronischen oder mechanischen Auftransformierung von Wechselspannungen, charakterisiert dadurch, dass die auftransformierte Spannung durch impulsweise Ausnutzung der induktiven Energie eines oder mehrerer Elemente mit induktivem Charakter gewonnen wird.
2. Ausführungsform des in Punkt 1 bestimmten Transformators, charakterisiert durch das elektronische Schaltelement auf Halbleiterbasis /1/ und den Kondensator /2/ zur Spannungsregelung.
3. Ausführungsform des in Punkt 1 bestimmten Transformators, charakterisiert durch das mechanische Schaltelement /1/ und den Kondensator /2/ zur Spannungsregelung.

9

.....
/Ákos Kun/

A u s z u g

Verfahren und Transformator zum elektronischen oder mechanischen Auftransformieren von Wechselspannung.

Das erfundene Verfahren zum Auftransformieren von Wechselspannungen und der auf Basis dieses Verfahrens herstellbare Transformator ermöglichen das Auftransformieren der zur Verfügung stehenden Wechselspannung ohne Anwendung der herkömmlichen induktiven Wandler, Spannungsvervielfacher. Die auftransformierte Spannung kommt unter Ausnutzung der induktiven Energie eines beliebigen Elementes mit induktivem Charakter zustande. Zur Ausbeutung der induktiven Energie dient ein elektronisches oder mechanisches Schaltelement.